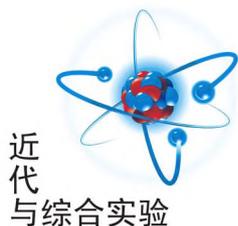


文章编号:1005-4642(2020)08-0014-06



近代
与综合实验

拉深新能源动力电池壳表面颈缩纹的研究

李超,宋杰,薛克敏

(合肥工业大学材料科学与工程学院,安徽合肥230009)

摘要:为了探明多道次拉深电池壳表面产生颈缩纹的原因及其对3003铝合金板料力学性能的影响,对3003铝合金多道次拉深进行了显微组织分析,并对其原材料3003铝合金进行力学性能、金相组织、化学成分以及原材料生产过程分析。研究表明:有颈缩纹缺陷的电池壳原材料的晶粒组织粗大且不均匀,其板料延伸率明显偏低。由于3003铝合金板料生产过程中退火温度过高、保温时间过长而形成的不均匀粗晶导致了多道次拉深时变形不均匀,最终表现为颈缩纹,而延伸率是影响颈缩纹形成和反映颈缩纹材料特征的参量之一。

关键词:颈缩纹;退火;晶粒度;延伸率;电池壳;3003铝合金

中图分类号:TG166.3;TG386.3

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.08.002

电池壳是新能源动力汽车高效储能的核心结构件之一,通过7道次拉深成形获得。3003铝锰系合金属于热处理不可强化的变形铝合金,因其具有密度小、强度适中、塑性高、焊接性能好、抗腐蚀性强、延展性好、表面光洁等优良的综合性能^[1],被广泛用于新能源动力电池壳的原材料。但是在实际生产中,每一批板料的性能存在差异,其中某个性能的差异将会导致拉深成形缺陷。经常出现的问题之一是多道次拉深电池壳时,电池壳表面出现颈缩纹,表面粗糙,增加产品报废率。相关研究发现3003铝合金退火时粗晶或者晶粒大小不均匀都将导致橘皮缺陷产生^[2],还有研究表明组织中夹杂物会引起断后伸长率不合格^[3]。本文通过对3003铝合金板料及其退火实验分析电池壳表面颈缩纹缺陷成因,提高新能源动力电池壳一次生产合格率,降低制程成本。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

待研究的矩形电池壳规格为长100 mm、宽20.5 mm、高141 mm,其原材料为3003-O态铝锰系合金,厚度为1.0 mm。对于3003铝合金板料一般生产工艺为:熔炼→连续铸轧(8.0 mm)→冷

轧(3.8 mm)→中间退火→冷轧(1.0 mm)→拉矫分切剖条→再结晶退火。

1.2 试验方法

1.2.1 动力电池壳形貌观察及化学成分测定

首先,使用基恩士3D显微系统对电池壳颈缩纹缺陷区域进行表面扫描,然后分别测量电池壳颈缩纹缺陷区域及正常电池壳表面的厚度。带有颈缩纹缺陷的电池壳及正常电池壳的表面形貌如图1所示。使用扫描电子显微镜(SEM)分别对电池壳正常的光亮部位以及颈缩纹缺陷区域放大100倍和300倍数下观察,分析颈缩纹区域能谱。



(a)颈缩纹电池壳表面 (b)正常电池壳表面

图1 电池壳表面的形貌对比

收稿日期:2020-02-10;修改日期:2020-04-16

作者简介:李超(1993-),男,安徽庐江人,合肥工业大学材料科学与工程学院2017级硕士研究生,研究方向为精密塑性成形与数值模拟。

通讯作者:薛克敏(1963-),男,安徽蚌埠人,合肥工业大学材料科学与工程学院教授,博士,主要从事精密塑性成形工艺研究。E-mail:HFUT-APFEC@163.com



为了进一步了解 3003 铝合金板材,分别用 Foundry-Master Pro 直读光谱仪对 3 个批次原材料按照 GB/T7999—2015 进行化学成分测定,其中,批次 A 与批次 B 原材料在实际生产中,产品良好,无尺寸外观不良;批次 C 原材料在实际生产中,电池壳表面出现颈缩纹缺陷。

1.2.2 3003 铝合金显微组织观察

对 3 个批次的 3003 铝合金板料,利用线切割在 3003 铝合金板料上割取 10 mm×10 mm×1 mm 试样,按照 GB/T3246.1—2012 进行金相试验。经过砂纸打磨、电解抛光(10 mL HClO₄ + 90 mL 无水乙醇,抛光时间 10 s 左右,电压 22 V 左右)、阳极覆膜(配比 4~5 mL HBF₄ 和 200 mL H₂O,覆膜时间 3~5 min,电压 16 V 左右)后在偏光显微镜下观察^[1]。

为了进一步了解退火温度以及退火时间对 3003 铝合金板料晶粒组织的影响,设计实验:分别对 3003 铝合金板料进行不同温度下(420,460,500 °C)保温 1 h 及 460 °C 保温不同时间(0.5,1,2 h)的退火处理,再按照 GB/T3246.1—2012 进行金相试验并观察其显微组织。

1.2.3 力学性能试验

由于板料的各向异性,力学性能指标对该电池壳多道次拉深有很大影响。

按照 GB/T228.1—2010 金属材料拉伸实验(第一部分:室温试验方法)设计拉伸实验。首先,按照比例试样设计方法,由 GB/T6397—1986 知,对于铝镁合金板材,一般取较小宽度,即名义宽度 $b_0 = 12.5$ mm,原始标距 $L_0 = 50$ mm,带头平行长度 $L_c = 75$ mm,夹持部分至少为拉伸机楔形夹具长度的 3/4(为便于样条总长度保持整数,取 32.49 mm),过渡圆弧半径取 25 mm,夹持头部宽度不低于 $1.2b_0$,即取 20 mm,如图 2 所示。

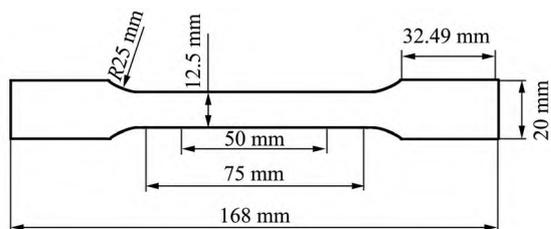


图 2 拉伸试样设计图

按上述条件从 3 个批次 3003 铝合金板料上用 Q11-3X1200 剪板机裁剪 200 mm×200 mm×

1 mm 的板料。按图 2 尺寸分别取 0°(平行于轧制方向),45°(与轧制方向成 45°),90°(与轧制方向垂直)方向各 3 个试样,如图 3 所示。



图 3 拉伸样条

在 SANS 拉伸试验机上进行实验。按照 GB/T228.1—2010 采用引伸计法,在室温下第 1 段拉伸实验速度为 2 mm/min,屈服测完后取下引伸计,设置第 2 段拉伸实验速度为 30 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 动力电池壳形貌及化学成分分析

基恩士 3D 显微系统扫描结果显示颈缩纹电池壳缺陷处高度存在明显差异,如图 4 所示,高度差达 200 μm 以上,表面粗糙。材料表面粗糙度与晶粒大小呈正相关,即晶粒越粗大,材料表面越粗糙^[5-7]。经过多道次拉深变形,各晶粒的变形差异大。变形取向有利的晶粒受周围晶粒拘束较小,发生变形则相对容易,易随变形而发生转动,只是在晶界处发生变形以及内应力累积,造成表面粗糙,即宏观上的颈缩纹^[8]。

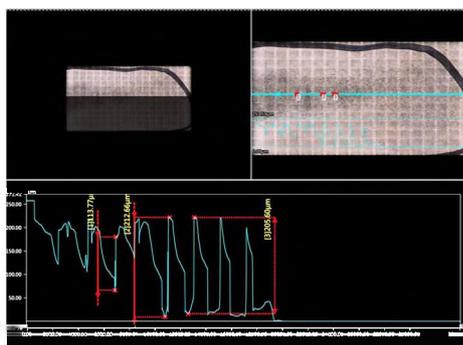
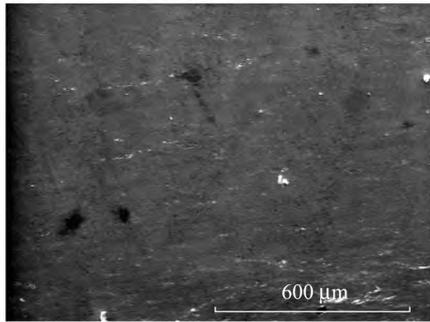


图 4 3D 显微系统扫描电池壳表面的颈缩纹

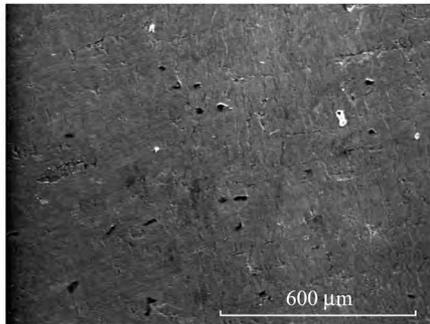
在扫描电子显微镜(SEM)100 倍下,明显看出颈缩纹电池壳样品表面形成滑移带,相对于正常电池壳光亮部位,带有颈缩纹缺陷的电池壳表面滑移带的数量少且宽度大[图 5(a)和(b)]. 在 300 倍下,可以看出正常的电池壳光亮部位整个表面显得平整[图 5(c)],有颈缩纹缺陷的电池壳

表面有明显的表面微裂纹[图 5(d)],且这些微裂纹是在滑移带的相交处形成.

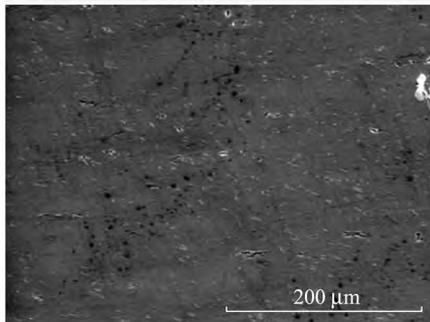
对微裂纹的部位做能谱分析,如图 6 所示,没有发现异常的杂质元素.



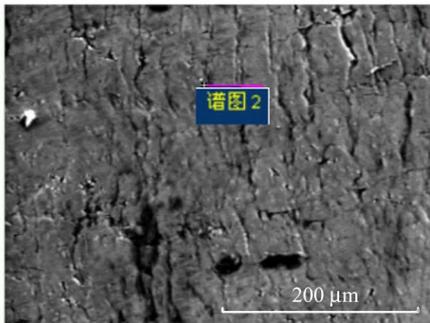
(a)正常部位(100×)



(b)颈缩纹缺陷部位(100×)



(c)正常部位(300×)



(d)颈缩纹缺陷部位(300×)

图 5 扫描电子显微镜观察电池壳表面

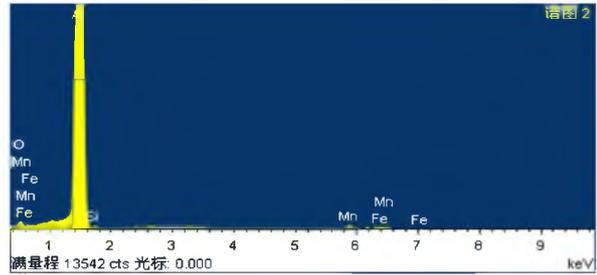
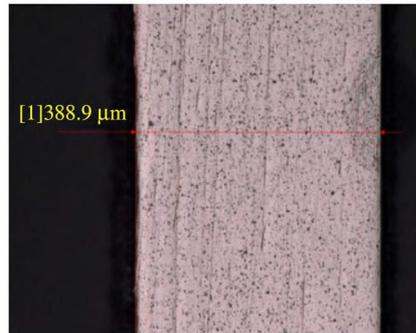
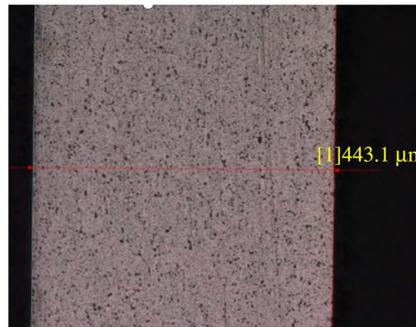


图 6 能谱分析

通过基恩士 3D 显微系统分别测量电池壳颈缩纹缺陷区域和正常电池壳表面的厚度,发现正常区域的壁厚为 443.1 μm,颈缩纹缺陷区域只有 388.9 μm,明显低于正常区域,如图 7 所示.变形后的颈缩纹缺陷电池壳不仅影响外观,其厚度变薄还存在充电解液后负压破裂风险.



(a) 颈缩纹缺陷部位(300×)



(b)正常电池壳部位(300×)

图 7 电池壳的厚度测量

表 1 为 3003 铝合金的化学成分,从表 1 可以看出,3 个批次原材料的化学成分无明显差异,且符合标准值范围要求,故结合对颈缩纹区域能谱分析结果,说明非冶金原因导致此缺陷.

表 1 3003 铝合金的化学成分

元素	$w_{标准}/10^{-2}$	$w_{实测}/10^{-2}$		
		批次 A	批次 B	批次 C
Si	0.6	0.19	0.19	0.18
Fe	0.7	0.49	0.50	0.49
Cu	0.05~0.2	0.082	0.065	0.088
Mn	1.0~1.5	1.11	1.06	1.06
Mg	≤ 0.015	0.009	0.005	0.008
Zn	≤ 0.015	0.014	0.002	0.01
Ti	> 0.01	0.038	0.035	0.032
Cr	< 0.01	0.000 7	0.000 4	0
Al	余量	98.066	98.143	98.132

2.2 3003 铝合金的显微组织

图 8(a)和(b)为合格的原材料的显微组织,其平均晶粒尺寸未超过 $40 \mu\text{m}$. 图 8(c)为颈缩纹缺陷的原材料的显微组织,其晶粒粗大,平均晶粒尺寸超过 $50 \mu\text{m}$. 从显微组织可以看出,批次 C 与批次 A 和 B 的显微组织的主要区别是晶粒的大小不同. 拉深过程,粗大晶粒的晶粒内部和晶界附近的应变量大,晶界处产生的变形累积严重,晶粒之间的变形相互协调困难,出现变形不均匀,表现出宏观可见的颈缩纹. 因此,粗晶粒的显微组织是导致 3003 铝合金板材经过多道次拉深变形后产生颈缩纹缺陷的主要原因.

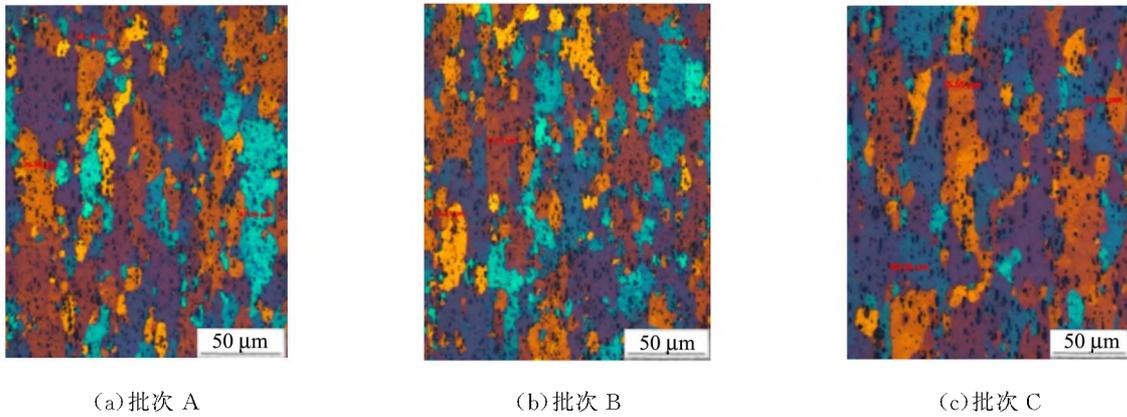


图 8 3003 铝合金的显微组织

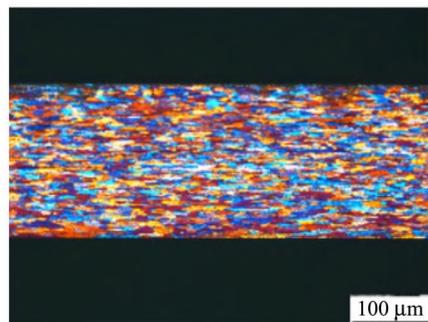
图 9 为 3003 铝合金在不同温度退火 1 h 后的显微组织,从图 9 中可知,随着退火温度的升高,晶粒不断长大. $460 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火 1 h 后出现细小的等轴晶粒,而 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火 1 h 后其晶粒组织明显比图 9(a)和(b)晶粒粗大.

图 10 为 3003 铝合金在 $460 \text{ }^\circ\text{C}$ 不同退火时间的显微组织,易看出随着保温时间的延长,晶粒也在不断长大. 图 10(c)所示的晶粒组织明显比图 10(a)和(b)晶粒粗大且不均匀. $460 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火 0.5 h 时开始出现小晶粒,再结晶开始,直到 1 h 后晶粒组织明显细小均匀.

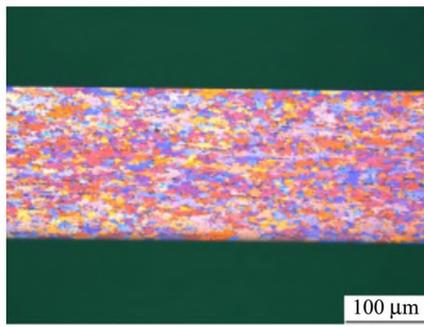
随退火温度升高,3003 铝合金板晶粒逐渐长大,完全再结晶温度为 $460 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右. 随保温时间的延长,晶粒有长大的趋势^[9-12]. 这是因为随着退火的进行,形变金属中畸变能的储存逐步得到释放,随时间的推移其释放速率不断下降. 在退火初始阶段,能量快速大量释放,回复过程随之加

快,晶粒细小. 随保温时间的延长,畸变能减少,系统趋于稳定状态,晶粒出现粗化现象.

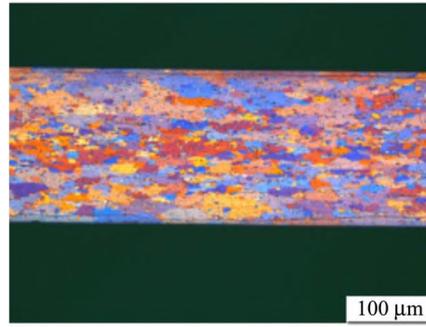
对于 3003 铝合金板料中间退火晶粒粗大问题,也有研究表明高温快速退火的完全再结晶退火可以阻碍晶粒的长大趋势^[12]. 在冷轧之前先将铸轧板进行高温均匀化处理,形成尺寸较大的 MnAl_6 粒子,冷轧后在退火过程中通过这些粒子诱发形核达到细化晶粒的目的^[13].



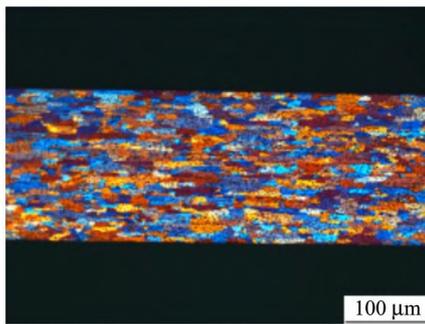
(a) $420 \text{ }^\circ\text{C}$



(b)460 °C

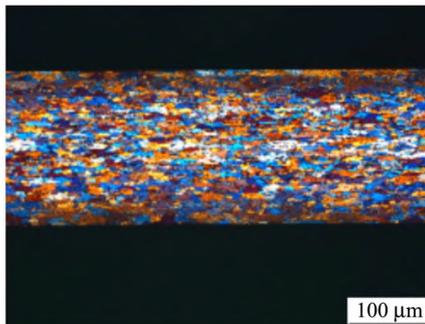


(c)2 h

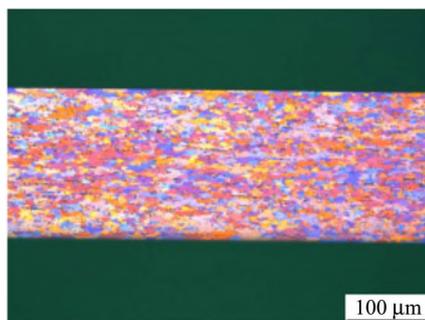


(e)500 °C

图 9 3003 铝合金在不同温度退火 1 h 后的显微组织



(a)0.5 h



(b)1 h

图 10 3003 铝合金在 460 °C 不同退火时间的显微组织

2.3 室温拉伸性能

拉伸试验结果如表 2 所示,其中 t 为样条厚度, R_m 为抗拉强度, $R_{p0.2}$ 为塑性应变为 0.2% 时的屈服强度, A_{50} 为延伸率. 从表 2 中可以看出,3 个批次的 3003 铝合金材料,抗拉强度与塑性应变为 0.2% 时的屈服强度没有明显差异. 平行于轧制方向的数值大于其他 2 个方向,主要是因为 3003 铝合金板材在轧制过程中形成基面织构,使板材表现出各向异性所致. 但有颈缩纹缺陷的电池壳原材料 3 个方向的延伸率均比外观正常的电池壳原材料低 29% 左右. 由此可知,批次 C 颈缩纹缺陷样品的晶粒度较粗与延伸率较低是相关的,细晶粒的 3003 铝合金具有较高的延伸率. 由文献[14]可知,延伸率高低与铝合金内部晶粒度大小有关. 这可能是影响颈缩纹形成和反映颈缩纹材料特征的参量之一.

表 2 3003 铝合金的力学性能

批次	t/mm	样条取向	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	A_{50}
A	1.005	0°	115	50	37.0%
	1.004	45°	105	46	39.0%
	1.005	90°	107	46	37.5%
B	0.999	0°	116	49	38.0%
	0.998	45°	104	45	39.0%
	0.999	90°	106	46	37.5%
C	1.003	0°	118	52	28.5%
	1.003	45°	103	48	27.0%
	1.004	90°	103	48	26.0%

3 结 论

多道次拉深过程,粗大晶粒的内部和晶界附近的应变差较大,晶界处产生的变形累积严重,晶粒之间的变形相互协调困难,出现变形不均

匀,表现出宏观可见的颈缩纹现象。颈缩纹缺陷样品的晶粒度较粗与延伸率较低是相关的。颈缩纹缺陷的电池壳原材料3个方向的延伸率均比外观正常的电池壳原材料都低。这是影响颈缩纹形成和反映颈缩纹材料特征的参量之一。

参考文献:

- [1] 黄晓辉,左秀荣,王齐伟. Al-Mn系合金研究现状[J]. 世界有色金属,2009(1):38-39.
- [2] 莫肇月,朱玉涛,刘莹. 固溶温度及拉矫延伸率对6061铝合金带材表面橘皮缺陷的影响[J]. 金属热处理,2018,43(6):183-185.
- [3] 陈艳华,杨金,王秀琴,等. DC01带钢生产工艺与断后伸长率不合格分析[J]. 物理测试,2014,32(1):29-31.
- [4] 韩德伟,张建新. 金相试样制备与显示技术[M]. 长沙:中南大学出版社,2005:189.
- [5] Yamaguchi K, Mellor P B. Thickness and grain size dependence of limit strain in sheet metal stretching [J]. International Journal Mechanical Sciences, 1976,18(2):85-90.
- [6] Kawai N, Nakamura T, Ukai Y. Surface roughening mechanism of polycrystalline metal sheet during plastic deformation: Effect of strain path on surface topography [J]. Bull JSME, 1986,29:1337.
- [7] 李萧,杨平,林瑞民,等. 低碳冲压钢板桔皮缺陷的成因[J]. 北京科技大学学报,2010,32(5):589-594.
- [8] Ma Mingtu, Mei Huasheng, Lu Hongzhou, et al. Morphology observation for surface orange peel and fracture in tension sample of aluminum-alloy sheet and characterization of nano hardness [J]. Engineering Sciences, 2012,10(6):2-6.
- [9] 樊奇,韩杰,胡在兵,等. 退火工艺对3003铝合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2015,44(12):178-181.
- [10] Birol Y. Response to annealing treatment of a twin-roll cast thin AlFeMnSi strip [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,209(1):506-510.
- [11] Birol Y. Response to annealing treatments of twin-roll cast thin Al-Fe-Si strips [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008,458(1/2):265-270.
- [12] 徐丽珠. 中间退火对3003铝合金板组织和晶粒度的影响[J]. 轻合金加工技术,2009,37(10):31-33.
- [13] 刘建文,涂益友,张敏达,等. 均匀化处理对AA3003铝合金铸轧板再结晶组织的影响[J]. 材料热处理学报,2010,31(3):107-111.
- [14] 马鸣图,杨亚红,吴娥梅,等. 铝合金板材拉伸变形时橘皮成因的研究进展[J]. 中国工程科学,2014,16(1):4-13.

Study on the surface necking of new energy powerbattery shell

LI Chao, SONG Jie, XUE Ke-min

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to find out the cause of necking phenomenon on the surface of multi-pass drawing battery shell and its influence on the mechanical properties of 3003 aluminum alloy sheet metal, the microstructure of 3003 aluminum alloy multi-pass drawing, and the mechanical properties, metallographic structure, chemical composition and raw material production process analysis of 3003 aluminum alloy, were analyzed. The results showed that the grain structure of the battery shell with necking defect was coarse and uneven, and the elongation of sheet metal was obviously low. Because the annealing temperature of 3003 aluminum alloy sheet metal was too high and the holding time was too long, the non-uniform coarse grain led to non-uniform deformation during the multi-pass drawing, and the elongation was one of the factors that affected the formation of neck indentation and reflected the characteristics of neck indentation material.

Key words: necking phenomenon; annealing temperature; grain size; elongation; battery shell; 3003 aluminum alloy

[责任编辑:任德香]